DOI:10.11931/guihaia.gxzw202408010

巴尔鲁克山国家级自然保护区岩生大型地衣群落特征的研究

杜来提罕·托合苏，热汗古丽·买买提艾力，雍海英，艾尼瓦尔·吐米尔*
（新疆大学 生命科学与技术学院 ，乌鲁木齐 830017）

摘　要：为查明巴尔鲁克山国家级自然保护区岩生大型地衣群落特征及物种分布与环境因子间的关系，该文采用双向指示种分析方法，对保护区岩生大型地衣群落进行数量分类并采用典范对应分析方法进行排序。结果表明：（1）分布在保护区的岩生大型地衣共 30 种（含 2 个变种）隶属于 6 科 14 属。其中，梅衣科、蜈蚣衣科及瓶口衣科为优势科，含 25 种，其种数占该地区岩生大型地衣总种数的 83.3%。（2）根据 TWINSPAN 分析将该保护区的岩生大型地衣分为 5 个群丛。群丛 1：长根皮果衣+皮果衣覆瓦原变种+*Dermatocarpon arnoldianum* 群丛；群丛 2：淡肤根石耳+蓝灰蜈蚣衣群丛；群丛 3：菊叶黄梅+怀俄明黄梅群丛；群丛 4：皱面粗根石耳+睫毛黑蜈蚣衣群丛；群丛 5：异白点蜈蚣衣+暗褐衣群丛。（3）α多样性指数显示，群丛 3 的多样性最大，群丛 5 的多样性最低；群丛间的β多样性指数较低。（4）CCA 排序结果反映，海拔、坡度、人为干扰、岩石大小等环境因子对岩生大型地衣物种分布的影响较显著，空气相对湿度和岩石的酸碱度对地衣的影响不显著；坡向、光照强度与地衣的分布呈负相关。综合分析表明，保护区岩生大型地衣群落结构较复杂，地衣物种分布受到自然和人为因素的共同影响，不同海拔间岩生大型地衣种类的差异不显著。

关键词：数量分类，环境因子，物种分布格局，海拔梯度，保护区
中图分类号：Q948.1　　　　　　**文献标识码**：**A**

Saxicolous macrolichen communities characteristics in the Barluk Mountain National Nature Reserve Xinjiang, China

TOKSUN Dolathan, MAMATALI Rehanguli, YONG Haiying, TUMUR Anwar*
(*College of Life Sciences and Technology*, *Xinjiang University*, Urumqi 830017, China)

Abstract: In this paper in order to investigate the characteristics of saxicolous macrolichen communities and the relation between species distribution and environmental factors in Barluk Mountain National Nature Reserve, the two way indicator species analysis (TWINSPAN) was used to numerical classification of community and canonical correspondence analysis(CCA) was used to analysis the relations between the species distribution and environmental factors. The results were as follows:（1）There are 30 saxicolous macrolichen (including 2 varieties) belong to 6 families and 14 genera were distributed in this nature reserve, among them Parmeliaceae, Physciaceae and Verrucariaceae were dominant families have 25 species, accounting 83.3% of total macrolichen species.（2）The saxicolous macrolichen communities were classified into 5 association according to TWINSPAN analysis result. Association 1: *Dermatocarpon moulinsii* + *Dermatocarpon miniatum* var. *Imbricatum* + *Dermatocarpon arnoldianum*; Association 2: *Umbilicaria virginis* + *Physcia caesia*; Association 3: *Xanthoparmelia somloensis* + *Xanthoparmelia wyomingica*; Association 4:

基金项目：国家自然科学基金（32160046）。
第一作者：杜来提罕·托合苏(1997—)，硕士研究生，主要研究方向为地衣资源学，(E-mail)3228001417 @qq.com。
*__通信作者__：艾尼瓦尔·吐米尔，博士，教授，主要从事地衣生态学研究，(E-mail)anwartumursk@xju.edu.cn。

Umbilicaria aprina + *Phaeophyscia ciliata*; Association 5: *Physcia phaea* + *Melanelia stygia*. （3） The α diversity index shows that association 3 has the highest diversity, while association 5 has the lowest diversity; the β diversity index between association is relatively low.（4）The CCA ordination result shows that, environmental factors such as altitude, slope, human disturbance, and rock size have a significant impact on the distribution of saxicolous macrolichen species, while air relative humidity and the acidity and pH of rocks have no significant impact on lichens; the aspect and light intensity are negatively correlated with the distribution of saxicolous macrolichens. Comprehensive analysis shows that the structure of the saxicolous macrolichen community in the protected area is complex, and the distribution of lichen species is influenced by both natural and human factors. There is no significant difference in lichen species between different altitudes.
Keywords: numerical classification, environmental factors, species distribution pattern, elevation gradient, nature reserve

地衣是由真菌与相应的藻类（蓝细菌）共生，并含有多种原核和真核微小生物的微生态系统（Zachariah &Varghese, 2018; 魏鑫丽等，2020）。大型地衣指裂片大于 5 mm 的地衣，该地衣是山地生态系统中重要的附生生物，其群落结构和物种多样性主要取决于与栖息地相关微气候因素的影响（Hale,1974；帕丽旦·艾海提等，2018）。岩生地衣指生长于岩石及其他矿质基质稳定表面的地衣，其可细分为岩石表生型地衣和岩石内生型地衣（Chen et al., 2000）。岩生大型地衣指在陆地生态系统中，生长在岩石表面的大型地衣，其在高山、高海拔地区参与水分平衡和营养物质积累，对维持生态系统的稳定性具有重要意义。岩生大型地衣作为先锋生物在高寒高海拔地区能促进岩石风化和土壤形成，这对植物群落的原生演替，改善栖息地微环境等都起到了重要作用（Scarciglia et al., 2012; Jackson, 2015）。

地衣物种分布和群落的构建受栖息地气候因子、栖息地空间结构、海拔、基物类型等诸多因素的综合影响（John & Dale,1990; Jonhn,1990；黄满荣，2010，2011；刘华杰等，2011）。其中气候和海拔对地衣物种的分布起决定性作用（Rahbek, 2005; Vittez et al., 2010; 黄满荣，2010, 2011；刘华杰等，2011）。不同的海拔区域其温度、湿度和太阳辐射各不相同（Körner, 2007），竞争能力强，对极端气候条件具有高度耐受性的物种可能不会在条件好的海拔区域出现，反而可能在条件不利的海拔区域中占优势（Armstrong & Welch, 2007）。国外的研究显示，岩生地衣群落的物种组成及其分布会受到岩石的坡度、坡向、光照强度、岩石孔隙度、岩石微观结构、岩石稳定性、岩石的理化性质、风化程度等因素的影响（Armstrong, 1974; John & Dale 1990; John,1990; Matthes et al., 2000; Anstett, 2010; MacDonald, 2011）。其中，岩石类型是驱动岩生地衣物种组成的主要因素，并与岩石表面粗糙度、矿物组成和内部孔隙度等多种因素共同决定了岩生地衣物种组成及群落结构（John & Dale, 1990; Jonhn,1990）；阿根廷中西部安第斯山脉对岩生地衣群落的研究显示，岩生地衣群落的物种丰富度、覆盖率和物种组成受到海拔和坡向的影响。中海拔地区岩生地衣群落的丰富度和覆盖度最高，低海拔地区坡向对岩生地衣群落物种组成和盖度的影响极显著（Costas et al.,2021）；美国密歇根州上半岛休伦山脉三个不同尺度对岩生地衣群落物种多样性的研究显示，太阳辐射和坡度/坡向指数等因子在中尺范围的变化影响岩生地衣群落物种丰富度（Rutherford et al, 2022）。国内的研究显示，地衣种类的海拔梯度分布规律在不同科属中存在差异（黄满荣，2010, 2011；刘华杰等，2011），这种差异的普遍性需要进一步检验。研究者对国内额尔齐斯河大峡谷、乌鲁木齐南山、托木尔峰国家级自然保护区、博格达山和乌鲁木齐石人沟山区等地区岩生地衣群落开展研究时发现，岩生地衣群落的物种多样性及分布主要受坡度、坡向、海拔高度、岩石大小、光照强度，

空气相对湿度和岩石 pH 等因素的影响，而人为干扰的影响不显著（艾尼瓦尔·吐米尔等，2013，2015a，b，2018；姜泽群等，2014；阿依努尔·吐松等，2018；帕丽旦·艾海提等，2018；买吾拉江·衣沙克和艾尼瓦尔·吐米尔，2021）。新疆巴尔鲁克山国家级自然保护区特殊的地理位置和自然条件，为各个地衣区系的接触、混合和特化创造了有利的环境，这使该地区地衣区系更具复杂性地衣群落更具独特性。该保护区大型地衣区系特征及物种多样性目前已有报道（热汗古丽·买买提艾力等，2023；Mamatali et al., 2024），热汗古丽·买买提艾力和艾尼瓦尔·吐米尔（2024）探讨了朽木附生地衣物种组成及群落特征等问题，但在岩生大型地衣群落及物种分布格局方面尚未见相关报道。经实地考察发现，岩生大型地衣是该保护区地衣群落的主要组成成分之一，目前有关保护区岩生地衣物种分布及其影响因素方面未见报道。因此，对巴尔鲁克山国家级自然保护区岩生大型地衣群落物种多样性、群落结构及其环境因素间的生态关系进行研究，将能为深入研究该保护区地衣群落构建机制及物种多样性维持机制提供基础资料，同时也将为有效保护该保护区地衣多样性提供更多可参考的科学数据，为生物监测保护区生态环境的变化和生态系的健康提供主要数据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究地区概况

巴尔鲁克山地处中国新疆塔城地区裕民县和托里县境内，过渡于天山山脉和阿尔泰山脉之间，山体大致呈西南一东北弧向延展，西南高东北低，西部与哈萨克斯坦接壤，山体主峰是塔普汗峰，海拔 3 252 m。该地区为典型大陆性温带半荒漠气候，北部湿润，东南部干旱。年均气温 6.2 ℃，极端最高温度 41.8 ℃，极端最低温度-35.9 ℃，平均蒸发量 1 021 mm，相对湿度 44%，年降水量 289.2 mm（塔吉古丽·艾麦提，2012；努尔巴依·阿布都沙力克，2013）。保护区地处 82°26′—83°13′ E、45°42′—46°03′ N，总面积 115 037.3 hm^2，保护区面积 89.50%位于裕民县境内，其余 10.50%位于托里县境内。保护区林地用地面积 34 614.95 hm^2，共有植物 81 科 444 属 1 178 种（塔吉古丽·艾麦提，2012；努尔巴依·阿布都沙力克，2013）。

1.2 研究方法

野外调查：2022 年 6 月至 2023 年 9 月在新疆裕民县和托里县巴尔鲁克山国家级自然保护区选择 47 个样点对大型地衣进行标本采集，其中 29 个样点分布岩生大型地衣。用手持 GPS 获取标本采集点的经纬度，海拔高度等信息。样点内每个岩石的坡度和坡向用坡度仪测量，用光照仪测量样点的光照强度，同时测量并记录空气湿度、岩石大小、人为干扰类型、岩石风蚀度等，岩石 pH 在实验室进行测量（表 1）。

表 1 29 个样点的环境参数

Table 1 Environmental factors of 29 sampling points

样点 Site	北纬 Latitude	东经 Longitude	海拔 Altitude (m)	光强度 Light intensity	空气相对湿度 Air relative humidity (%)	坡度 Slope	坡向 Aspect	干扰强度 Disturbance degree	岩石大小 Rock size (cm)	风蚀程度 Erosion degree	岩石 pH 值 Rock pH value
1	45°47′50″ N	82°25′20″ E	968	4	1	25	SE	1	100～150	1	7.24
2	45°47′31″ N	82°26′49″ E	1 075	2	2	29	S	2	70～125	2	7.30
3	45°44′31″ N	82°29′54″ E	1 213	2	3	23	SW	2	75～180	2	7.48
4	45°55′26″ N	82°44′06″ E	1 191	3	2	45	NW	1	100～250	1	7.36
5	45°55′25″ N	82°44′01″ E	1 176	1	4	38	S	4	100～180	2	7.32
6	45°52′16″ N	82°44′21″ E	1 180	4	1	42	N	1	50～100	2	7.54
7	45°53′30″ N	82°44′59″ E	1 271	2	4	35	S	2	⩾250	2	7.12
9	45°52′09″ N	82°44′14″ E	1 345	2	4	40	N	2	⩾250	2	7.25
10	45°44′36″ N	82°30′59″ E	1 379	4	1	25	W	2	70～125	3	7.23
12	46°01′04″ N	83°02′08″ E	1 302	4	1	40	E	2	150～220	3	7.77
15	45°47′11″ N	82°55′53″ E	2 080	3	2	65	S	3	⩾200	1	7.62
18	45°54′54″ N	82°44′44″ E	1 234	3	2	36	NW	2	50～100	1	6.88
22	45°55′56″ N	82°42′36″ E	1 121	2	2	38	E	2	70～125	1	7.05
25	45°55′02″ N	82°44′45″ E	1 184	1	4	40	N	2	50～100	3	7.32
26	45°54′21″ N	82°44′50″ E	1 286	1	1	55	S	1	⩾250	3	7.42
27	45°45′35″ N	82°26′60″ E	1 215	5	1	50	SE	1	150～220	3	7.81

28	45°45′11″ N	82°26′43″ E	1 093	5	1	42	NE	1	150～220	1	7.52
29	45°55′16″ N	82°44′21″ E	1 277	4	2	25	N	2	100-150	1	7.50
30	45°53′39″ N	82°46′01″ E	1 243	4	1	33	E	1	75～180	1	7.36
31	46°01′27″ N	83°01′56″ E	1 445	4	1	41	E	1	50～100	2	7.44
32	45°44′30″ N	82°30′05″ E	1 224	4	2	38	S	2	⩾250	2	7.78
33	45°44′21″ N	82°30′19″ E	1 307	3	2	52	NW	2	100～150	3	7.26
34	45°47′33″ N	82°27′13″ E	1 117	2	2	40	W	2	75～180	1	7.48
35	45°47′04″ N	82°26′38″ E	1 618	2	2	25	W	2	50～100	3	7.51
36	45°47′35″ N	82°27′02″ E	1 103	2	1	30	E	2	100～150	3	7.35
37	45°47′02″ N	82°27′01″ E	1 098	3	1	58	NE	2	50～100	1	7.25
42	45°53′45″ N	82°45′05″ E	1 250	5	2	52	S	3	50～100	3	7.08
44	46°01′40″ N	83°01′24″ E	1 573	4	1	48	N	3	70～125	3	7.25
46	45°47′15″ N	82°56′16″ E	2 014	4	1	32	NW	2	⩾250	3	7.18

注：光强度　**1**．弱光照；**2**．较弱光照；**3**．中等光照；**4**．较强光照，**5**．强光照。空气相对湿度　**1**．干燥；**2**．较干燥；**3**．中等；**4**．较潮湿；**5**．潮湿。坡向　**S**．南向；**N**．北向；**E**．东向；**W**．西向；**NW**．西北向；**NE**．东北向；**SW**．西南向；**SE**．东南向。干扰强度　**1**．无干扰；**2**．干扰较少；**3**．中等干扰；**4**．干扰较多；**5**．干扰多。风蚀程度　**1**．轻度；**2**．中度；**3**．重度。

Note: Light intensity　**1**. Weak; **2**. Relative weak; **3**. Medium; **4**. Relative strong; **5**. Strong. Air relative humidity　**1**. Dry; **2**. Relative dry; **3**. Medium; **4**. Relative humid; **5**. Humid. Aspect　**S**. Southern; **N**. Northern; **E**. Eastern; **W**. Western; **NW**. North west; **NE**. North east; **SW**. South west; **SE**. South east. Disturbance degree　**1**. None; **2**. Weak; **3**. Medium; **4**. Relative strong; **5**. Strong. Erosion degree　**1**. Slight; **2**. Medium; **3**. Extreme.

在分布岩生大型地衣的 29 个样点内设置面积为 20 m × 20 m 的样方 4 个，共 116 个，在样方内用尺寸为 20 cm × 20 cm、30 cm × 30 cm 和 50 cm × 50 cm 的自制样方框计数每一种岩生大型地衣在样方中的覆盖度。根据地衣体外部形态和内部解剖结构，并结合物种特征化合物显色反应法对地衣进行物种鉴定（阿不都拉·阿巴斯和吴继农，1998; Brodo et al., 2001；Brodo, 2016）。

1.3 数据分析

对岩生大型地衣群落采用 Win TWINS 2.3 软件进行双向指示种（TWINSPAN）数量分类（欧光龙等，2008；艾尼瓦尔·吐米尔等，2015）。采用 ComEcoPac 多元数据分析软件分别计算 Shannon-Weiner、Simpson's、Patricks、Margalef 、Pielou 均匀度等α多样性指数和 Jaccard's β多样性指数（郭水良等，2014；张金屯，2022）。

2 结果与分析

2.1 保护区岩生大型地衣种类组成

保护区的岩生大型地衣共 30 种（含 2 个变种）隶属于 6 科 14 属（表 2）。其中，梅衣科（12 种）、蜈蚣衣科 （7 种）、瓶口衣科（6 种）占优势，种数占该地区岩生大型地衣总种数的 83.3%，单属单种科有树花衣科（1 种）和胶衣科（1 种）。在属级水平上：黄梅属（*Xanthoparmelia*）（5 种）、皮果衣属（*Dermatocarpon*）（3 种 2 变种）、褐衣属（*Melanelia*）（4 种）、蜈蚣衣属（*Physcia*）（4 种）和石耳属（*Umbilicaria*）（3 种）含 21 个种，占该地区岩生大型地衣总种数的 70%；北极梅属（*Arctoparmelia*）、扁枝衣属（*Evernia*）、山褐衣属（*Montanelia*）、树花属（*Ramalina*）、小皿叶属 （*Normandina*）、黑蜈蚣衣属（*Phaeophyscia*）、大孢衣属（*Physconia*）、胶衣属（*Collema*）和哑铃孢属（*Heterodermia*）9 个属中，各属分别仅含 1 种。

表 2 巴尔鲁克山自然保护区岩生大型地衣种类及其重要值

Table 2 Saxicolous macrolichen species and important values on Barluk Mountain Nature Reserve

属和种 Name of genus and species	种名缩写 Abbreviation of species name	盖度 Coverage (%)
北极梅属 *Arctoparmelia*		
平坦北极梅 *A. separata*	*Asep*	1.04
胶衣属 *Collema*		
砖孢胶衣 *C. subconveniens*	*Csub*	0.62
皮果衣属 *Dermatocarpon*		
D. arnoldianum	*Darn*	2.80
皮果衣 *D.miniatum*	*Dmin*	6.45
皮果衣覆瓦原变种 *D. miniatum* var. *imbricatum*	*Dimb*	10.63
皮果衣重叠瓣变种 *D. miniatum* var. *complicatum*	*Dcom*	0.30
长根皮果衣 *D. moulinsii*	*Dmou*	26.40
扁枝衣属 *Evernia*		
柔扁枝衣 *E. divaricata*	*Ediv*	7.92
哑铃孢属 *Heterodermia*		
哑铃孢 *H. speciosa*	*Hspe*	2.10
褐衣属 *Melanelia*		
暗褐衣 *M. stygia*	*Msty*	12.74
巧褐梅 *M. incolorata*	*Minc*	2.22

毡褐梅 *M. panniformis*	*Mpan*	1.12
茸褐梅 *M. glabra*	*Mgla*	6.86
山褐衣属 *Montanelia*		
假杯点山褐衣 *M. disjuncta*	*Mdis*	3.23
小皿叶属 *Normandina*		
小皿叶 *N. pulchella*	*Npul*	0.65
蜈蚣衣属 *Physcia*		
白粉蜈蚣衣 *P. biziana*	*Pbiz*	0.57
蓝灰蜈蚣衣 *P. caesia*	*Pcae*	22.96
疑蜈蚣衣 *P. dubia*	*Pdub*	3.85
异白点蜈蚣衣 *P. phaea*	*Ppha*	29.56
黑蜈蚣衣属 *Phaeophyscia*		
睫毛黑蜈蚣衣 *P. ciliata*	*Pcil*	4.03
大孢衣属 *Physconia*		
甘肃大孢蜈蚣衣 *P. kansuensis*	*Pkan*	1.69
树花属 *Ramalina*		
石生树花 *R. intermedia*	*Rint*	4.25
黄梅属 *Xanthoparmelia*		
杜瑞氏黄梅 *X. durietzii*	*Xdur*	23.56
淡腹黄梅 *X. mexicana*	*Xmex*	0.37
菊叶黄梅 *X. somloensis*	*Xsom*	62.14
怀俄明黄梅 *X. wyomingica*	*Xwyo*	36.57
北美黄梅 *X. viriduloumbrina*	*Xvir*	6.64
石耳属 *Umbilicaria*		
皱面粗根石耳 *U. aprina*	*Uapr*	4.32
多盘石耳 *U. proboscidea*	*Upro*	0.78
淡肤根石耳 *U. virginis*	*Uvir*	13.3

2.2 岩生大型地衣群落的数值分类

以 30 种岩生大型地衣的盖度为指标，对研究地区 29 个样点的岩生大型地衣进行双向指示种分析（图 1），根据 TWINSPAN 分析结果把岩生大型地衣划分为以下 5 个群丛。

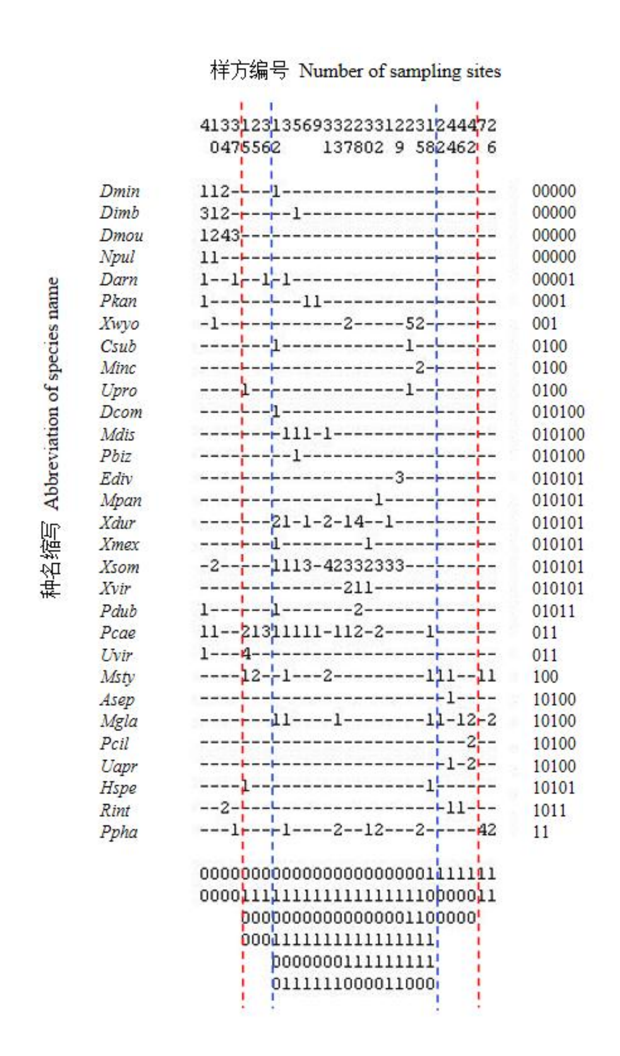


图 1　岩面生大型地衣 TWINSPAN 分类结果矩阵图

Fig. 1　TWINSPAN analysis diagram of saxicolous macrolichen

群丛 1：分别为海拔 1 098~1 380 m 的样点 4、10、34、37，较干燥且光照强度中等、人为干扰较少，坡向西北向、西向和东北向、岩石大小 50~250 cm 且岩石 pH 值 7.23~7.48 比较中性。主要的岩生大型地衣种类有 *Dermatocarpon arnoldianum*、皮果衣覆瓦原变种（*D. miniatum* var. *imbricatum*）、长根皮果衣（*D. moulinsii*）、皮果衣（*D. miniatum*）、小皿叶（*Normandina pulchella*）、甘肃大孢蜈蚣衣（*Physconia kansuensis*）、怀俄明黄梅（*Xanthoparmelia wyomingica*）、菊叶黄梅（*X. somloensis*）、疑蜈蚣衣（*Physcia dubia*）、蓝灰蜈蚣衣（*P. caesia*）、异白点蜈蚣衣（*P. phaea*）、皱面粗根石耳（*Umbilicaria aprina*）和石生树花（*Ramalina intermedia*）13 个种，总盖度为 55.85%，其中皮果衣重叠瓣变种（*Dermatocarpon miniatum* var. *complicatum*）盖度为最大 26.40%，定名为长根皮果衣+皮果衣覆瓦原变种+*Dermatocarpon arnoldianum* 群丛。

群丛 2：包括样点 15、25、36。其中样点 15 海拔为 2 081 m，样点 25 和样点 36 海拔分别为 1 184、1 103 m，光照强度弱，人为干扰较少。主要的岩生大型地衣种类包括皮果衣、淡肤根石耳（*Umbilicaria virginis*）、蓝灰蜈蚣衣、皱面粗根石耳、茸褐梅（*Melanelia glabra*）和哑铃孢（*Heterodermia speciosa*）6 个种，总盖度为 30.35%，其中淡肤根石耳盖度为最大 12.50%，定名为淡肤根石耳+蓝灰蜈蚣衣群丛。

群丛 3：包括 1、2、3、5、6、9、12、18、27、28、29、30、31、33、32 和 35 等 16 个样点，这组样点海拔在 9 69~1 396 m，光照强度较强、岩面 pH 为 6.88~7.81、岩石风化程度中等、人为干扰较少。主要分布有异白点蜈蚣衣、疑蜈蚣衣、蓝灰蜈蚣衣、白粉蜈蚣衣（*Physcia biziana*）、甘肃大孢蜈蚣衣、哑铃孢、淡腹黄梅（*Xanthoparmelia mexicana*）、怀俄明黄梅、

北美黄梅（*X. viriduloumbrina*）、菊叶黄梅、杜瑞氏黄梅（*X. durietzii*）、暗褐衣（*Melanelia stygia*）、茸褐梅、巧褐梅（*M. incolorata*）、毡褐梅（*M. panniformis*）、假杯点山褐衣（*Montanelia disjuncta*）、石生树花、砖孢胶衣（*Collema subconveniens*）、长根皮果衣（*Dermatocarpon moulinsii*）、多盘石耳（*Umbilicaria proboscidea*）21 种，总盖度为 169.42%，其中菊叶黄梅盖度为最大 57.90%，定名为菊叶黄梅+怀俄明黄梅群丛。

群丛 4：包括样点 22、42、44、46。其中，除样点 22 的海拔为 2 015 m 外，其他 3 个样点的海拔在 1 121m 至 1 173 m 之间，空气比较干燥，光照强度中等，人为干扰较大，岩石风蚀比较重，岩石 pH 在 7.05 ~7.25 之间。主要的岩生大型地衣种类有睫毛黑蜈蚣衣（*Phaeophyscia ciliata*）、石生树花、平坦北极梅（*Arctoparmelia separata*）、暗褐衣 、茸褐梅、皱面粗根石耳、菊叶黄梅 7 个种，总盖度为 15.19%，其中皱面粗根石耳盖度为最大 4.29%，定名为皱面粗根石耳+睫毛黑蜈蚣衣群丛。

群丛 5：由样点 7 和样点 26 组成。这两个样点海拔分别为 1 271 m 和 1 286 m，岩石风蚀程度中度，坡向南向和东向，人为干扰较少，岩石大小均大于 250 cm。主要的岩生大型地衣种类有异白点蜈蚣衣、暗褐衣、茸褐梅、巧褐梅、怀俄明黄梅、淡腹黄梅 6 个种，总盖度为 22.16 %，其中异白点蜈蚣衣盖度为最大 17.29 %，定名为异白点蜈蚣衣+暗褐衣群丛。

各群丛的多样性、均匀度指数和相似性指数见表 3 和表 4。

由表 3 可知，群丛 3 的岩生大型地衣物种多样性最大，种类数量最多，含 21 个种，其 Shannon-Weiner 多样性、Simpson's 多样性、Margalef 指数分别为 2.856、0.436 和 3.948。组成该群丛的的样点数最多，广泛分布在海拔 969~1 396 m 之间的样点，各样点的光照强度较强、岩面 pH 在 6.88~7.81 之间、岩石风化程度中等，人为干扰较少。其次为群丛 1 的多样性和种类数量较多，含 13 个种，其多样性指数分别为 2.745、0.325 和 2.983。分布在群丛 5 的岩生大型地衣含 6 个种，其多样性指数最低分别为 1.756、0.166 和 1.465。从均匀度指数的分布可知，种类数量最多的群丛 3 的均匀度指数最低为 0.624，我们认为由于分布的种类较多，种间竞争比较强烈导致不同物种个体在群丛间分布呈不均匀性。群丛 4 的种类数量中等，各种类的个体在群丛样点中分布均匀，其均匀度指数最大为 0.901。

表 3 岩面生大型地衣群丛α多样性和均匀度指数

Table 3 α diversity and evenness index of saxicolous macrolichen association

群丛 Association	Patrick 指数 Patrick index	Shannon-Weiner 多样性 Shannon-Weiner diversity	Simpson's 多样性 Simpson's diversity	Margalef 指数 Margalef index	均匀度指数 Evenness index
群丛1 Association 1	13	2.745	0.325	2.983	0.679
群丛2 Association 2	6	1.875	0.224	1.516	0.725
群丛3 Association 3	21	2.856	0.436	3.948	0.624
群丛4 Association 4	9	2.574	0.272	2.231	0.901
群丛5 Association 5	6	1.756	0.166	1.465	0.695

由表 4 可知，在巴尔鲁克山国家级自然保护区岩生大型地衣群丛间的β多样性普遍较低。其中，群丛 1 和群丛 3 的 Jaccard's 指数最高，为 0.363。组成该群丛的地衣分布的光照强度较

强，岩石风化程度中等，较干燥的环境。其次为群丛 4 和群丛 5 的 Jaccard's 指数，分别为 0.200。群丛 2 和群丛 4 的 Jaccard's 指数最小，为 0.071。β多样性是描述在某一环境梯度上的多样性变化的差异和物种沿环境梯度更替的速率（张金屯，2020）。经研究发现，该保护区岩生大型地衣种类随海拔梯度更替的速率不显著，除了群丛 1 和群丛 3 分布的地衣种类出现更替外，其他群丛包含的地衣种类随不同样点的植被带、森林的郁闭度、人为干扰强度、空气湿度及岩石的风化程度等微环境因素没有发生显著的更换，因此群丛间的β多样性指数较低。

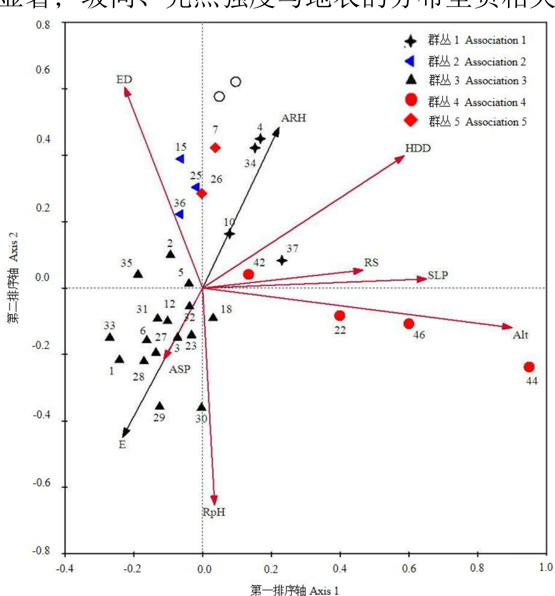
表 4 岩面生大型地衣群丛β多样性指数

Table 4 β diversity index of saxicolous macrolichen

Jaccard's 指数 Jaccard's index	群丛2 Association 2	群丛3 Association 3	群丛4 Association 4	群丛5 Association 5
群丛1 Association 1	0.172	0.363	0.158	0.117
群丛2 Association 2		0.125	0.071	0.187
群丛3 Association 3			0.111	0.080
群丛4 Association 4				0.200

2.3 岩生大型地衣分布与环境关系

采用 CCA 排序对岩生大型地衣群落进行分析。由样点的 CCA 二维排序（图 2）可知，CCA 排序第一轴与海拔高度呈正相关，相关系数为 0.864 6（表 5），为极显著，第一排序轴与坡度和人为干扰强度也呈正相关，即沿 CCA 排序第一轴从左到右，海拔逐渐升高，岩石的坡度逐渐增大，人为干扰强度逐渐强大；第二排序轴与风蚀度、空气相对湿度、人为干扰呈正相关，相关系数分别为 0.558 1、0.446 3 和 0.367 5，与光强度、海拔、坡向、岩石 pH 呈负相关。沿 CCA 第二排序轴，岩石的风蚀越来越严重，空气湿度和人为干扰影响逐渐变大，海拔与第二排序轴呈负相关，其相关系数为-0.110 1，不显著。由此可见，海拔、坡度、人为干扰、岩石大小等环境因子对岩生大型地衣物种分布的影响较为显著，空气相对湿度和岩石的酸碱度对地衣的影响不显著；坡向、光照强度与地衣的分布呈负相关。



Alt. 海拔；**E**. 光强度；**ARH**. 空气相对湿度；**SLP**. 坡度；**ASP**. 坡向； **HDD**. 人为干扰强度；**RS**. 岩石大小；**ED**. 风蚀度； **RpH**. 岩石 pH 值。下同。

Alt. Altitude; **E**. Illuminance; **ARH**. Air relative humidity; **SLP**. Slope; **ASP**. Aspect; **HDD**. Human disturbance

degree; **RS**. Rock size; **ED**. Erosion degree; **RpH**. Rock pH value. The same below.

图 2 样点与环境因子关系的 CCA 排序图

Fig.2 CCA ordination of the relationships between sampling points and environmental factors

由物种 CCA 排序轴与环境因子的相关性（表 5）可见，第一排序轴和第二排序轴与环境因子呈极显著相关，特征值为 0.692 和 0.634，物种-环境相关性为 96.1%和 92.3%，物种-环境相关性方差累计贡献率达到 52.2%。

表 5 物种与环境因子和典范对应分析前 4 个排序轴的相关性

Table 5 The correlation between species, environmental factors and the first four axis of CCA analysis

环境因子 Environmental factor	第一排序轴 Axis 1	第二排序轴 Axis 2	第三排序轴 Axis 3	第四排序轴 Axis 4
海拔 Altitude	0.864	-0.110	0.063	0.264
光强度 Illuminance	-0.223	-0.415	0.491	0.447
空气相对湿度 Air relative humidity	0.213	0.446	-0.247	0.018
坡度 Slope	0.625	0.026	0.337	0.143
坡向 Aspect	-0.108	-0.198	0.075	0.077
人为干扰强度 Human disturbance degree	0.563	0.367	0.074	-0.376
岩石大小 Rock size	0.448	0.049	-0.203	0.509
风蚀度 Erosion degree	-0.218	0.558	-0.026	0.078
岩石 pH 值 Rock pH value	0.033	-0.603	-0.056	0.208
特征值 Eigenvalue	0.692	0.634	0.560	0.478
物种-环境因子相关性 Species and environmental factors correlation	0.961	0.923	0.879	0.840
物种方差累计贡献率 Cumulative contribution rate of species variance (%)	9.100	17.400	24.700	31.000
物种-环境关系方差累计贡献率 Cumulative percentage variance of species-environment relation (%)	22.000	52.200	60.000	75.200

从 CCA 排序图 3 可知，岩生大型地衣种的分布格局所揭示的环境梯度与群落类型的分布梯度有很大的相似性。排序图第 1 象限中的睫毛黑蜈蚣衣、皱面粗根石耳、白粉蜈蚣衣、茸褐梅、异白点蜈蚣衣等种类分布在空气湿度较大和人为干扰较强烈的样点；暗褐衣、*Dermatocarpon arnoldianum*、蓝灰蜈蚣衣和甘肃大孢蜈蚣衣分布在空气湿度较低，坡度较小的岩石上。多盘石耳分布在中等坡度，人为干扰适中的样点。第 2 象限中的平坦北极梅分不在湿度较大，风蚀比较严重的岩石上，砖孢胶衣、巧褐梅和怀俄明黄梅分布在低海拔、无干扰、比较干燥和风蚀较轻的岩石分布的样点。第 3 象限中的柔扁枝衣（*Evernia divaricata*）和淡腹黄梅分布在干燥 、干扰较少和阴暗的森林下面分布的岩石上，皮果衣、皮果衣覆瓦原变种、皮果衣重叠瓣变种、毡褐梅、假杯点山褐衣、小皿叶、疑蜈蚣衣、石生树花、杜瑞氏黄梅、菊叶黄梅和北美黄梅等种类分布在低海拔、坡度较小的样点中。第 4 象限中的淡肤根石耳分布在高海拔地区，哑铃孢分布在中等海拔，而长根皮果衣分布在较低海拔。

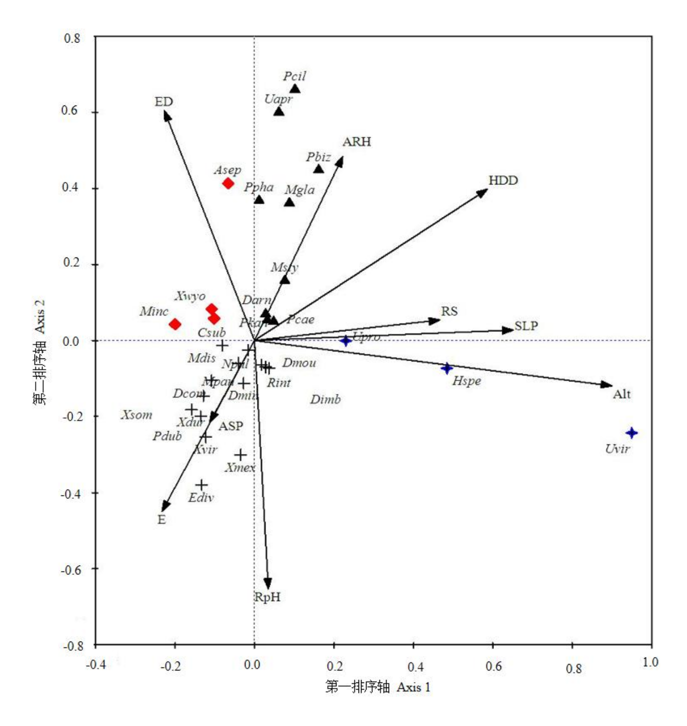


图 3 中的物种缩写字母与表 2 相同。

The abbreviated letters of species in Fig. 3 are the same as those in Table 2.

图 3 岩生大型地衣种类与环境因子关系的 CCA 排序图

Fig. 3 CCA ordination of the relationships between saxicolous macrolichen species and environmental factors

3 讨论与结论

经研究发现，分布在巴尔鲁克山国家级自然保护区分布在不同海拔的岩生大型地衣群丛的物种多样性之间存在差异。群丛 3 的岩生大型地衣主要分布在低中海拔地区的样点中，该生境的光照强度较强、岩面 pH 在 6.88~7.81 之间，岩石风化程度中等，很少受到人为干扰的影响。因此，耐辐射和高温的黄梅属、皮果衣属、褐衣属和蜈蚣衣属等占优势。分布在中等海拔的群丛 1 和群丛 4 的物种多样性中等，主要分布在较干燥、光照强度中等和人为干扰很少的样点中。黄梅属、蜈蚣衣属和石耳属、黑蜈蚣衣属、大孢衣属的种类占优势。群丛 5 和群丛 2 的岩生大型地衣多样性最小，主要分布在林下地带的样点，地衣种类较少，岩生大型地衣的分布主要受到栖息地微环境因素的影响，如岩石种类较单一，栖息地异质性较少，主要由面积 2 500 cm^2 以下的小岩石组成。因此，我们认为保护区的岩生大型地衣群丛的物种多样性差异不仅受到海拔梯度的影响，还与不同科属地衣种类的形态结构和环境适应能力有关。

空间异质性和栖息地多样性是群落物种丰富度的重要决定因素（Lundholm, 2009）。一般栖息地环境异质性较高，将为多种地衣种类提供合适的栖息地环境，从而提高多样性，如果栖息地异质性较低，则会导致地衣种类减少，从而降低多样性（Lundholm, 2009）。本研究β多样性的计算结果表明，保护区岩生大型地衣种类与海拔梯度更替的速率关系不显著，除了群丛 1 和群丛 3，其他群丛包含的地衣种类随着不同样点的植被带、人为干扰强度、空气湿度及岩石的风化程度等微环境因素没有发生显著的更替。说明了保护区不同海拔岩生地衣栖息地微环境的异质性较低 。因此，我们建议在保护区的不同景观适当增加栖息地异质性，这一举措将有利于提高岩生大型地衣的物种多样性，从而更有效地保护地衣多样性。

研究还发现保护区岩生大型群落的结构并不均匀，CCA 排序结果显示，群落的结构与物种组成主要取决于海拔、坡度、人为干扰、岩石大小等环境因子影响。空气相对湿度和岩石的酸碱度对地衣的影响不显著；坡向、光照强度与地衣的分布呈负相关。研究结果发现，海

拔、坡度、人为干扰、岩石大小是影响保护区岩生大型地衣群落物种分布的主要因子，这与博格达峰（艾尼瓦尔·吐米尔等，2018）、托木尔峰（艾尼瓦尔·吐米尔等，2015）、石人沟（阿依努尔·吐松等，2018）和哈熊沟森林公园（买吾拉江·衣沙克和艾尼瓦尔·吐米尔，2020）等地区的岩生地衣群落的研究结果基本符合，但我们得到的空气相对湿度和岩石的酸碱度对岩生大型地衣的影响不显著与其他研究存在一定的差异。我们认为出现这种结果与研究区的自然环境、岩石的种类、森林郁闭度等多种因素以及地衣本身的形态结构差异有关。

综上所述，巴尔鲁克山国家级自然保护区的地理位置特殊，地衣资源丰富，其中岩生大型地衣广泛分布在不同海拔岩石表面，形成稳定的群落，通过形成土壤改变了栖息地微环境，促进了植物群落的原生演替。本研究发现，保护区岩生大型地衣的群落较复杂，群落的物种组成和地衣种类的分布受到多种自然和人为因素的影响，并且地衣体的形态结构和生长型也影响地衣对栖息地环境的适应性，从而影响群落的构建。因此，建议保护区今后应加强放牧管理，减少人为干扰，适当提高环境异质性，建立以大型地衣为主的保护区环境质量评价和生态系统健康评估机制是非常必要的。

参考文献:

ABBAS A, WU JN, 1998. Lichens of Xinjiang [M]. Urumqi: Science Technology & Hygiene Publishing House of Xinjiang: 1-178. [阿不都拉·阿巴斯，吴继农，1998. 新疆地衣[M]. 乌鲁木齐：新疆科技卫生出版社：1-178.]

ABDUSHALIKE N, 2013. Universal scientific exploration of Barluk Mountain Nature Reserve, Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang University Press: 1-183. [努尔巴依·阿布都沙力克，2013. 新疆巴尔鲁克山自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐：新疆大学出版社：1-183.]

AHAT P, ABBAS A, TUMUR A, 2018. Characteristics of saxicolous crustose lichen community on northern slope of Bogda Mountain in Xinjiang and its correlation with environmental factors[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 27(4): 21-30. [帕丽旦·艾海提，阿不都拉·阿巴斯，艾尼瓦尔·吐米尔，2018. 新疆博格达山北坡岩面生壳状地衣群落特征及其与环境因子的相关性 [J]. 植物资源与环境学报，27(4)：21-30.]

AHAT P, ABBAS A, TUMUR A, 2018. Species diversity and distribution characteristics of macrolichens around the Bogda Mountains, Xinjiang, China [J]. Mycosystema, 37(7): 907-918.[帕丽旦·艾海提，阿不都拉·阿巴斯，艾尼瓦尔·吐米尔，2018. 中国新疆博格达山周边地区大型地衣物种多样性及分布特征[J]. 菌物学报，37(7)：907-918.]

ANSTETT D, 2010. The influence of wind and light exposure on the extent of lichen coverage in an alpine environment[J]. Journal Undergrad Life Science, 4: 8-41.

ARMSTRONG R, 1974. The descriptive ecology of saxicolous lichens in an area of South Merionethshire, Wales [J]. Journal of Ecology, 62(1): 33-45.

ARMSTRONG RA, WELCH AR, 2007. Competition in lichen communities[J]. Symbiosis, 43: 1-12.

BRODO IM, 2016. Keys to Lichens of North America: Revised and Expanded[M]. New Haven: Yale University Press: 1-427.

BRODO IM, SHARNOFF SD, SHARNOFF S, 2001. Lichens of North America[M]. New Haven: Yale University Press:118-145.

CHEN J, BLUME HP, BEYER L, 2000. Weathering of rocks induced by lichen colonization—a review[J]. Catena, 39:121- 46.

COSTAS SM, CANTON N, RODRIGUEZ JM, 2021. The relative effect of altitude and aspect on saxicolous lichen communities at mountain summits from central-west of Argentina[J]. Rodriguesia, 72: e00282020.2021.

GUO SL, YU J, CHEN GQ, 2015. Ecological data analyses: methods, programs and software[M]. Science Press: 103-175. [郭水良，于晶，陈国奇，2015. 生态学数据分析——方法、程序与软件[M] . 北京：科学出版社：103-175].

HALE ME, 1974. The biology of lichens[M]. London: Edward Arnold: 84-96.

HUANG MR, 2010. Altitudinal patterns of Stereocaulun(Lichinized Ascomycota) in China[J]. Acta Oecologica, 36: 173-178.

HUANG MR, 2011. An analysis on the altitudinal pattern of *Stereocaulun* in China[M]// LIU HJ, JIA ZF, REN Q, ZHOU QM. The present status and potentialities of the lichenology in China—A collection of Lichenological papers in congratulation of the Eightieth Birthday of CAS member, Dr. Sc. Prof. Wei Jiangchun. Beijing: Science Press: 289-298. [黄满荣，2011. 中国珊瑚枝属地衣海拔分布分析[M] // 刘华杰，贾泽峰，任强，周启明. 中国地衣学现状与潜力——祝贺魏江春院士八旬华诞地衣学文集. 北京：科学出版社：289-298.]

ISSAK M, TUMUR A, 2021. Study of the characteristics of saxicolous lichen communities on the Southern slope of Bogda Peak, Xinjiang, China [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 38(5): 576-587. [买吾拉江·衣沙克，艾尼瓦尔·吐米尔，2021. 新疆博格达峰南坡岩面生地衣群落特征的研究[J]. 新疆大学学报（自然科学版），38(5)：576-587.]

ISSAK M, TUMUR A, 2020. Species diversity and community structure of saxicolous lichens in Haxionggou Forest Park[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 34(3): 124-129. [买吾拉江·衣沙克，艾尼瓦尔·吐米尔，2020. 哈熊沟森林公园岩面生地衣物种多样性及群落结构研究[J]. 干旱区资源与环境，34(3)：124-129.]

JACKSON TA, 2015. Weathering, secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment[J]. Geoderma, 251/252: 78-91.

JIA XN, CHENG JM, WANG HE, 2007. Application present situation of DCA, CCA and DCCA ordination of grassland vegetation communities in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 23(12)：391-395. [贾晓妮，程积民，万惠娥，2007. DCA、CCA和DCCA三种排序方法在中国草地植被群落中的应用现状[J]. 中国农学通报，23(12)：391-395.]

JIANG ZC, ZHANG T, ABBAS A, et al., 2014. Quantitative classification of saxicolous lichen communities in Ergis River gorge, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 28(8): 167-171. [姜泽群，张婷，阿不都拉·阿巴斯，等，2014. 新疆额尔齐斯河大峡谷岩面生地衣群落数量分类[J]. 干旱区资源与环境，28(8)：167-171.]

JOHN EA, DALE MRT, 1990. Environmental correlates of species distributions in a saxicolous lichen community[J]. Journal of Vegetation Sciences, 1 (3): 385-392.

JOHN EA, 1990. Fine scale pattern of species distribution in a saxicolous lichen community at Jonas rockslide, Canadian Rocky Mountains[J]. Holarctic Ecology, 13: 187-194.

KÖRNER C, 2007. The use of altitude in ecological research[J]. Trends in Ecology & Evolution, 22: 569-574.

LIU HJ, HUANG MR,WU QF, et al., 2011. An analysis on the altitudinal pattern of *Peltigera* in China[J]. Mycosystema, 30(6): 955-964. [刘华杰，黄满荣，吴清凤，等，2011. 中国地卷属地衣海拔分布分析[J]. 菌物学报，30(6): 955-964.]

LIU HJ, WU QF, LI HM, 2011. The influence of macroclimatic factores on the spatial distribution of *Peltigera* at county scale in China[M]// LIU HJ, JIA ZF, REN Q, et al. The present status and potentialities of the lichenology in China — A collection of lichenological papers in congratulation of the Eightieth Birthday of CAS member, Dr. Sc. Prof. Wei Jiangchun. Beijing: Science Press: 289-298. [刘华杰，吴青凤，李红梅，2011. 气候因子在旗县尺度上对中国地卷属地衣分布的影响[M]// 刘华杰，贾泽峰，任强，等. 中国地衣学现状与潜力-祝贺魏江春院士八旬华诞地衣学文集. 北京：科学出版社：263-275.]

LUNDHOLM JT, 2009. Plant species diversity and environmental heterogeneity: spatial scale and competing hypotheses[J]. Journal of Vegetation Sciences, 20: 377-391.

MACDONALD AM, LUNDHOLM JT, CLAYDEN SR, 2011. Saxicolous lichens on a Nova Scotian Coastal Barren[J]. Northeastern Naturalist, 18(4): 475-488.

MAMATALI R, YONG HY, TOKSUN D, et al., 2024. Diversity of macrolichens in the Barluk Mountain National Nature Reserve in Xinjiang, China[C]. IFBioScFU 2024, BIO Web of Conferences 100, 02024 (2024).

MAMATALI R, KAHRIMAN, TUMUR A, 2023. Preliminary study on maocolichen flora in Barluk Mountain National Nature Reserve, Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 37(7): 170-176. [热汗古丽·买买提艾力，卡合勒曼，艾尼瓦尔·吐米尔，2023. 新疆巴尔鲁克山国家级自然保护区大型地衣区系的初步研究[J]. 干旱区资源与环境，37(7): 170-176.]

MAMATALI R, TUMUR A, 2024. The structural characteristics and diversity of the saprophytic lichen communities on Barluk Mountain National Nature Reserve[J]. Journal of Northeast Forestry University, 52(6): 43-50.[热汗古丽·买买提艾力，艾尼瓦尔·吐米尔，2024. 巴尔鲁克山国家级自然保护区的朽木生地衣群落结构特征及其多样性[J]. 东北林业大学学报，52(6): 43-50.]

MATTHES U, RYAN BD, LARSON DW, 2000. Community structure of epilithic lichens on the cliffs of the Niagara Escarpment, Ontario, Canada[J]. Plant Ecology, 148 (2): 233-244.

RAHBEK C, 2005. The role of spatial scale and the perception of large scale species-richness patterns[J]. Ecological Letters, 8: 224-239.

RUTHERFORD RD, REBERTUS A, 2022. A habitat analysis and influence of scale in lichen communities on granitic rock[J]. The Bryologist, 125 (1): 43-60.

SCARCIGLIA F, SAPORITO N, LA RUSSA MF, 2012. Role of lichens in weathering of granodiorite in the Sila uplands (Calabria, southern Italy)[J]. Sedimentary Geology, 280: 119-134.

TAJIGULI A, 2012. The forest ecosystem services valuation of Barlehtaw Nature Reserve[D]. Urumqi: Xinjiang University: 25-31. [塔吉古丽·艾麦提.新疆巴尔鲁克山自然保护区森林生态系统服务功能价值评估[D]. 乌鲁木齐：新疆大学：25-31.]

TUMUR A, ZHANG T, MUHAMAT M, et al., 2013. Species distribution of saxicolous foliose lichen communities in Xiaoquzi southern mountainous area of Urumqi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 27(7): 142-147. [艾尼瓦尔· 吐米尔，张婷，马衣拉·莫合买提，

等，2013. 新疆南山小渠子林场岩面生叶状地衣分布格局的研究 [J]. 干旱区资源与环境，27(7)：142-147.

TUMUR A, ABBAS A, 2015. Quantitative classification of saxicolous lichen community in Xinjiang Tumur Peak National Natural Reserve and its correlation with environment [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 24(2): 80-87. [艾尼瓦尔·吐米尔，阿不都拉·阿巴斯，2015. 新疆托木尔峰国家级自然保护区岩面生地衣群落数量分类及其与环境相关性[J]. 植物资源与环境学报，24(2)：80-87.]

TUMUR A, ABDULLA A, ABBAS A, 2015. Characteristics of saxicolous lichen communities in Altay two river source Nature reserve in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29 (9): 74-79. [艾尼瓦尔·吐米尔，阿地力江·阿不都拉，阿不都拉·阿巴斯，2015. 新疆阿尔泰山两河源自然保护区岩面生地衣群落特征的研究[J]. 干旱区资源与环境，29 (9)：74-79.]

TUMUR A, MAMUT R, ABBAS A, 2018. Community structure characteristics of saxicolous lichens in the Baogda Mountains of Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 38 (3): 1053-1064. [艾尼瓦尔·吐米尔，热衣木·马木提，阿不都拉·阿巴斯，2018. 新疆博格达山岩面生地衣群落结构特征[J]. 生态学报，38 (3)：1053-1064.]

TURSUN A, ABBAS A, TUMUR A, 2018. Environmental interpretation of saxicolous lichen distribution pattern in Shirengou mountains, Xinjiang, China[J]. Guihaia, 38(11): 1454-1462. [阿依努尔·吐松，阿不都拉·阿巴斯，艾尼瓦尔·吐米尔，2018. 新疆石人沟山区岩面生地衣群落分布格局的环境解释[J]. 广西植物，38(11)：1454-1462.]

VITTOZ P, CAMENISCH M, MAYOR R, et al., 2010. Subalpine nival gradient of species richness for vascular plants, bryophytes and lichens in the Swiss Inner Alps[J]. Botanica Helvetica, 120: 139-149.

WEI XL, DENG H, WEI JC, 2020. Evaluation on endangered grade of lichens in China[J]. Biodiversity, 28 (1): 54-65. [魏鑫丽，邓红，魏江春，2020. 中国地衣的濒危等级评估[J]. 生物多样性，28 (1)：54-65.]

ZACHARIAH SA, VARGHESE SK, 2018. The lichen symbiosis: A review[J]. International Journal of Scientific Research and Reviews, 7 (3): 1160-1169.

ZHANG JT, 2022. Numerical ecology[M]. 3rd. Beijing: Science Press: 124-248. [张金屯，2022. 数量生态学：第三版[M]. 北京：科学出版社：124-248.]